

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СО И NO_x ПРИ АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

И.С. Берсенев¹, В.И. Клейн¹, А.Ю. Петрышев¹, Ю.Г. Ярошенко²

¹ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие «ТОРЭКС»
(г. Екатеринбург, Россия)

²ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Проанализированы условия формирования оксидов углерода и азота при агломерации железных руд. На основании экспериментальных данных установлено, что основным механизмом формирования NO_x при агломерации являются образование «термических» оксидов азота в высокотемпературной зоне слоя (зоне горения). Основным фактором, определяющим содержание СО в агломерационных газах, является отношение воздуха, поступающего в слой, к количеству горючего углерода. Главным техническим решением для снижения объемов выбросов СО и NO_x является агломерация в высоком (до 600–700 мм) слое с минимальным расходом твердого топлива.

Ключевые слова: агломерат, СО, NO_x, высокий слой, спекание, агломашина, механизм.

In the article one has analyzed the conditions of formation of carbon and nitrogen oxides in iron ore sintering. Based on experimental data one has indicated that the main mechanism of NO_x formation during sintering is the formation of «thermal» nitrogen oxides in the high temperature zone of the sinter bed (firing zone). The main factor determining the CO content in sinter gases is the ratio between the air percolating the sinter bed to the quantity of fuel carbon. The main technical solution to reduce the emissions of CO and NO_x is sintering with the high (up to 600..700 mm) bed with the minimum consumption of the solid fuel.

Keywords: sinter, CO, NO_x, high sinter bed, sintering, sinter machine, mechanism

На предприятиях полного технологического цикла «вклад» агломерационного производства в общее количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу достигает 50–60 % [1]. Одними из наиболее опасных компонентов этих выбросов являются оксиды азота (NO_x) и монооксид углерода (СО). Высокая токсичность соединений и недостаток информации об особенностях их формирования в спекаемом слое обуславливают актуальность исследования закономерностей их генезиса и разработки на этой основе способов снижения техногенного воздействия на окружающую среду. Ранее в работах [2, 3] на основании экспериментальных данных были получены некоторые данные об особенностях формирования выбросов при агломерации, которые легли в основу настоящей статьи, цель которой – количественная оценка объемов выбросов NO_x и СО при агломерации железных руд в зависимости от технологических факторов.

Процесс слоевого горения твердого топлива в агломерационном слое осложнен параллельным протеканием окислительно-восстановительных процессов, суммарный результат которых можно проанализировать по изменению содержания закиси железа в спеке. При этом количество выбросов СО зависит от величины стехиометрического коэффициента $n_{\text{ст}}$, соответствующего отношению CO_2 в газообразных продуктах спекания к СО. Многочисленные экспериментальные данные о показателях работы аглофабрик России [3] позволяют установить зависимость между средним значением стехиометрического коэффициента $n_{\text{ст}}$ и удельным расходом воздуха на процесс агломерации железорудного сырья (с вероятностью 96 %) она может быть описана степенной функцией:

$$n_{\text{ст}} = 5,61 \cdot 10^{-6} \left(\frac{V_{\text{в}}}{G_{\text{с}}} \right)^{4,8}. \quad (1)$$

Анализ этих статистических данных позволил установить, что в условиях реального агломерационного процесса горение твердого топлива осуществляется с удельным расходом воздуха, изменяющимся в узком диапазоне значений 12,5–15,5 м³/кг горючего углерода кокса, который определяется в основном условиями теплообмена. При этом величина отмеченного интервала практически не зависит от содержания углерода в шихте. Было также установлено, что условия протекания реального агломерационного процесса железных руд и концентратов с изменением параметра $V_{\text{в}}/G_{\text{с}}$ от 12,5 до 15,5 характеризуется изменением $n_{\text{ст}}$ в диапазоне 1,0...3,0 и сопровождается снижением содержания монооксида углерода в уходящих газах с 2,46 % до 1,28 % (при одном и том же составе шихты), что соответствует уменьшению величины химического недожога на 5,7 мДж/кг углерода (рис. 1).

При недостатке воздуха (менее 12,5 м³/кг) процесс горения твердого топлива сопровождается снижением полноты его развития, что характеризуется повышением химического недожога, снижением скорости спекания агломерационной шихты и понижением производительности установки. Получаемый при этом агломерат, как правило, имеет повышенные прочностные

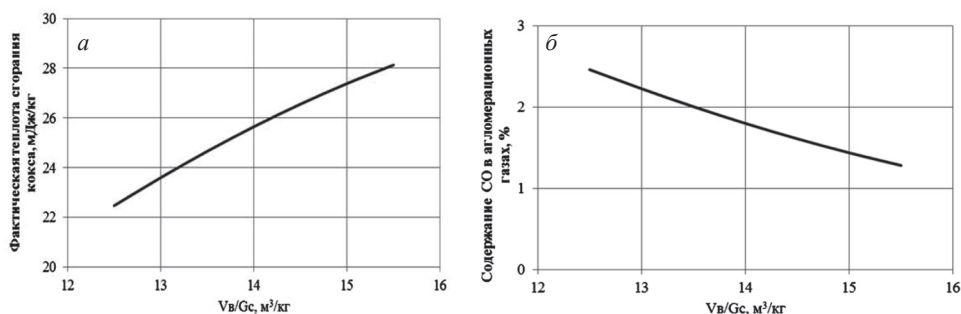


Рис. 1. Зависимости фактической теплоты сгорания углерода кокса (а) и содержания СО в технологических газах (б)

показатели. Более высокие значения удельного расхода воздуха способствуют увеличению производительности агломашины при ухудшении качественных показателей получаемых спеков.

Таким образом, количество формируемого в процессе спекания СО зависит от абсолютного содержания углерода топлива, сгоревшего при спекании, и удельного расхода воздуха на его горение, что позволяет рассчитать объем выбросов монооксида углерода. Полученные данные могут быть использованы при прогнозной оценке выбросов NOx при агломерации.

Ранее, в работе [2], была установлена зависимость между содержанием СО в технологических газах агломашины и содержанием NOx. Она может быть описана выражением:

$$\text{NOx} = 144 \times \text{CO} + a, \quad (2)$$

где NOx – объемная доля оксидов азота в аглогазах, ppm; СО – объемная концентрация СО в аглогазах, %; a – эмпирический коэффициент.

Из экспериментальных данных, представленных в работе [2], следует, что зависимость NOx–СО имеет линейный характер, при этом все аппроксимирующие прямые имеют одинаковый угол наклона относительно оси ординат. Линейную связь между концентрацией СО в дымовых газах и NOx можно объяснить тем, что оба эти соединения формируются в высокотемпературной области под действием одних и тех же факторов. Наибольшая часть (не менее 75 %) этого загрязнителя формируется из азота воздуха в «зоне горения», при температуре выше 1100 °С, по механизму Я.Б. Зельдовича [4]. Эти оксиды принято называть «термическими».

Меньшая часть оксидов азота (менее 25 % от общего объема) представлена оксидами, сформированными той долей азота из состава твердого топлива, которая не связана с летучими. NOx, образованный по механизму Фенимора («быстрые» оксиды азота), вероятно, обуславливает наличие оксидов азота в периоды спекания, когда горение топлива только начинается либо завершается, т.е. когда условий для «термических» оксидов азота не создается (температура на поверхности топливных частиц низка, а концентрация СО в газах близка к нулю). Именно эта часть NOx, а также оксиды азота, образованные при горении газообразного топлива в зажигательном горне, определяют величину коэффициента a в выражении (2). Эту версию подтверждают результаты эксперимента на «аглочаше», приведенные в работе [2], где коэффициент a в выражении (2) близок к нулю. Это, вероятно, обусловлено как использованием коксовой мелочи с низкой долей летучих составляющих, так и более качественным сжиганием топлива в лабораторном зажигательном горне.

Представленные зависимости (1) и (2) позволяют, в первом приближении, количественно оценивать величину выбросов СО и NOx при агломерации железных руд. На рис. 2 проиллюстрированы зависимости концентраций СО и NOx при повышении значения V_b/G_c в интервале 12,5–15,5 м³/кг.

Из полученных данных видно, что увеличение V_b/G_c на каждый 0,5 м³/кг приводит к снижению содержания СО в аглогазах на 0,196 % (абс.) и NOx на 28,3 ppm (абс.), что соответствует снижению объемов выбросов того и другого загрязнителя на 16,7 % (отн.).

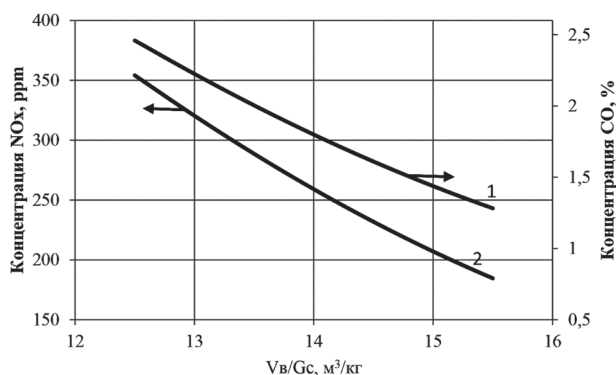


Рис. 2. Зависимости концентраций CO и NOx от значения $V_{в}/G_c$

На основании изложенного, в качестве мероприятий по снижению выбросов CO следует использовать режимы спекания, обеспечивающие минимальный расход твердого топлива при относительно высоком удельном расходе воздуха на спекание. Уменьшение же количества NOx в выбросах аглофабрик возможно за счет создания условий, препятствующих образованию «термических» NOx. Главным техническим решением для снижения объемов образования и того, и другого газообразного загрязнителя является агломерация в высоком (до 600–700 мм) слое с минимальным расходом твердого топлива.

Выводы

1. Представлены зависимости (1) и (2), которые позволяют оценивать величину выбросов CO и NOx при агломерации железных руд. Их использование позволило установить, что увеличение удельного расхода воздуха на горение углерода в слое с 12,5 до 15,5 $\text{м}^3/\text{кг}$ приводит к снижению выбросов CO и NOx на 16,7 % (отн.) на каждые 0,5 $\text{м}^3/\text{кг}$.

2. Главным техническим решением для снижения объемов выбросов CO и NOx является агломерация в высоком (до 600–700 мм) слое с минимальным расходом твердого топлива, что дает возможность снизить абсолютную величину выбросов CO и препятствует формированию «термических» NOx оксидов азота.

Список использованных источников

1. Дробный О.Ф. Совершенствование технологии агломерационного производства с целью снижения его воздействия на окружающую среду (на примере ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»): Автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.Ф. Дробный. – Магнитогорск, 2012.
2. Берснев И.С. Механизм формирования оксидов азота при агломерации железных руд / И.С. Берснев, А.Ю. Петрышев, Ю.Г. Ярошенко // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2015. – № 4 (1384). – С. 72–74.
3. Берснев И.С. Определение резервов экономии твердого топлива при агломерации железных руд / И.С. Берснев, В.И. Матюхин, Ю.Г. Ярошенко, В.И. Клейн, Б.А. Боковиков // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 30–32.
4. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 352 с.